

О. П. МАКСИМЕНКО, Д. И. ЛОБОЙКО, Ю. А. МИНИНА

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В ОЧАГЕ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ПРОКАТКЕ

Исследования с целью создания новых технологий, требуют более точного учёта энергетических затрат в зоне контакта полосы с вальцами. Для этого было проведено исследование, направленное на разработку новой методики определения момента формоизменения металла, основанная на расчете средней результирующей внутренних продольных сил в очаге деформации. Предложенная методика определения момента, основана на ранее предложенной методике оценки продольной устойчивости процесса прокатки. Эта методика позволяет на основе решения дифференциального уравнения Т. Кармана получить теоретические эпюры распределения нормального давления, удельных сил трения и текущих значений внутренних напряжений вдоль очага деформации. На основе этих теоретических эпюр определяется средняя результирующая внутренних продольных сил пластически деформируемого металла. В работе был выполнен сравнительный анализ величины момента, создаваемого средней результирующей внутренних продольных сил с величиной момента формоизменения, определяемого по известной формуле Финка. Расчеты показали, что существует определенная согласованность между изменением момента формоизменения, определенным по известной формуле и моментом от действия средней результирующей внутренних сил, определенной по предложенной методике. В зависимости от рассматриваемых параметров прокатки они синхронно либо возрастают, либо уменьшаются. Теоретические исследования показали, что средняя результирующая представляет собой внутреннюю силу, которую необходимо преодолеть активным силам, чтобы обеспечить формоизменение металла в продольном направлении. Именно в этом заключается физическая суть этой силы. Расчеты момента формоизменения по предложенной методике дают результаты превышающие значения его, вычисленные по формуле Финка на 15–30 %. Исследования в работе также показали, что момент формоизменения полосы зависит от условий трения на контакте.

Ключевые слова: момент формоизменения, очаг деформации, трение, внутренние продольные силы, давление.

О. П. МАКСИМЕНКО, Д. І. ЛОБОЙКО, Ю. О. МІНІНА

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ВЗАЄМОДІЇ В ОСЕРЕДКУ ДЕФОРМАЦІЇ ПРИ ПРОКАТЦІ

Дослідження з метою створення нових технологій, вимагають більш точного обліку енергетичних витрат в зоні контакту смуги з вальцями. Для цього було проведено дослідження, спрямоване на розробку нової методики визначення моменту формозміни металу, заснована на розрахунку середньої результируючої внутрішніх поздовжніх сил в осередку деформації. Запропонована методика визначення моменту, заснована на раніше запропонованій методиці оцінки поздовжньої стійкості процесу прокатки. Ця методика дозволяє на основі рішення диференціального рівняння Т. Кармана отримати теоретичні епюри розподілу нормального тиску, питомих сил тертя і поточних значень внутрішніх напружень вздовж осередку деформації. На основі цих теоретичних епюр визначається середня результируюча внутрішніх поздовжніх сил пластично деформованого металу. У роботі був виконаний порівняльний аналіз величини моменту, створюваного середньої результируючої внутрішніх поздовжніх сил з величиною моменту формозміни, що визначається за відомою формулою Финка. Розрахунки показали, що існує певна узгодженість між зміною моменту формозміни, визначеним за відомою формулою і моментом від дії середньої результируючої внутрішніх сил, визначеної за запропонованою методикою. Залежно від розглянутих параметрів прокатки вони синхронно або збільшуються, або зменшуються. Теоретичні дослідження показали, що середня результируюча являє собою внутрішню силу, яку необхідно подолати активним силам, щоб забезпечити формозміну металу в поздовжньому напрямку. Саме в цьому полягає фізична суть цієї сили. Розрахунки моменту формозміни за запропонованою методикою дають результати, що перевищують його значення, обчислені за формулою Финка на 15–30 %. Дослідження в роботі також показали, що момент формозміни смуги залежить від умов тертя на контакті.

Ключові слова: момент формозміни, осередок деформації, тертя, внутрішні поздовжні сили, тиск.

O. P. MAKSIMENKO, D. I. LOBOIKO, Yu. A. MININA

STUDY OF ENERGY COOPERATION IN THE DEFORMATION ZONE DURING ROLLING

Studies to create new technologies require more accurate accounting of energy costs in the zone of contact of the strip with rollers. To this end, a study was conducted aimed at developing a new method for determining the moment of metal change, based on the calculation of the average resulting internal longitudinal forces in the deformation zone. The proposed method for determining the moment is based on the previously proposed method for estimating the longitudinal stability of the rolling process. This technique allows to obtain theoretical diagrams of the distribution of normal pressure, specific friction forces and current values of internal stresses along the deformation zone based on the solution of T. Karman's differential equation. On the basis of these theoretical plots, the average resultant internal longitudinal forces of the plastically deformed metal are determined. A comparative analysis of the magnitude of the moment created by the average resultant internal longitudinal forces with the magnitude of the moment of change defined by the well-known Fink formula was performed. Calculations showed that there is a certain consistency between the change in the moment of change, defined by a known formula and the moment from the action of the average resulting internal forces, determined by the proposed method. Depending on the considered rolling parameters, they synchronously either increase or decrease. Theoretical studies have shown that the average resultant is an internal force that must be overcome by active forces in order to ensure that the metal is shaped in the longitudinal direction. This is the physical essence of this force. Calculations of the time of change according to the proposed method give results exceeding its values calculated by the Fink formula by 15–30 %. Studies in the work also showed that the moment of shaping the strip depends on the friction conditions at the contact.

Keywords: moment of change, deformation zone, friction, internal longitudinal forces, pressure.

Введение. Работа формоизменения металла в очаге деформации при прокатке определяется, также, как и при осаживании, по формуле Финка [1, 2]. Она затрачивается на преодоление внутренних сил пластически деформируемой полосы и зависит от физико-механических свойств прокатываемого металла, геометрии очага деформации, температуры и

кинematики процесса. С учётом анализа, проведенного В. Н. Выдриным [3], эта формула приобрела вид:

$$A_{\phi} = 2k_{cp} \cdot h_1 \cdot b_1 (1 + S) R \psi \ln \frac{h_0}{h_1}, \quad (1)$$

где $2k_{cp}$ – среднее сопротивление металла пластической деформации;

h_0 и h_1 – начальная и конечная толщина полосы;

S – опережение металла;

R и ψ – радиус и угол поворота валков, соответствующий длине прокатываемой полосы.

Как известно [3], формула Финка в сравнении с экспериментом, дает существенно заниженные результаты. Заметим, что исследования, связанные с созданием новых технологий, требуют более точного учёта энергозатрат в зоне контакта полосы с валками.

Поэтому дальнейшее изучение рассматриваемого вопроса представляется актуальным. Для оценки продольной устойчивости процесса прокатки в работах [4, 5] разработана методика определения средней результирующей горизонтальных сил пластически деформируемого металла $Q_{ср.пр.}$. Текущее значение этой силы можно рассчитать, исходя из выражения:

$$Q_{ср.пр.} = \sigma_x h_x b_{ср} = (p_x - 2k_{ср}) (h_1 + R\varphi^2) b_{ср}, \quad (2)$$

предварительно получив эпюру нормальных напряжений, например, решая уравнение Т. Кармана. Тогда:

$$Q_{ср.пр.} = \frac{1}{\alpha} \int_0^\alpha Q_{ср.пр.} d\varphi, \quad (3)$$

где σ_x – продольное нормальное напряжение;

h_x – текущее значение толщины полосы в зоне контакта полосы с валками;

$b_{ср}$ – средняя ширина полосы;

φ – текущий угол захвата.

Согласно работе [5] для того, чтобы обеспечить устойчивый процесс прокатки контактными силами необходимо преодолеть среднюю результирующую $Q_{ср.пр.}$. Схема действия сил в очаге деформации с учётом средней результирующей приведена на рис. 1

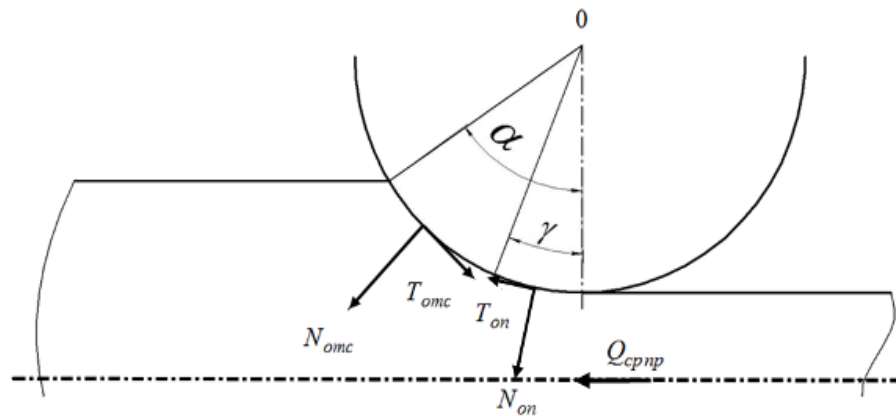


Рис. 1 – Схема сил в очаге деформации с учётом средней результирующей внутренних сил

В первом приближении момент, создаваемый этой силой, определяется

$$M_Q = Q_{ср.пр.} R \quad (4)$$

Сравним его с моментом формоизменения:

$$M_\phi = \frac{A_\phi}{\psi} = 2k_{ср} h_1 b_1 (1+S) R \cdot \ln \frac{h_0}{h_1}, \quad (5)$$

предварительно приведя их к безразмерному виду:

$$M_Q^* = \frac{M_Q}{2k_{ср} R \cdot b_{ср} \cdot R} = \frac{Q_{ср.пр.}}{2k_{ср} R \cdot b_{ср}} = Q_{ср.пр.}^* \quad (6)$$

$$M_\phi^* = \frac{M_\phi}{2k_{ср} R \cdot b_{ср} \cdot R} = \frac{h_1}{R} \cdot \frac{b_1}{b_{ср}} (1+S) \cdot \ln \frac{h_0}{h_1} \approx \frac{h_1}{R} \cdot (1+S) \cdot \ln \frac{h_0}{h_1} \quad (7)$$

С учётом потерь на трение скольжения верхней

оценки для M_Q^* и M_ϕ^* может служить момент на бочках валков, который определяется:

$$2M_6 = t_{ср} R \cdot b_{ср} \cdot R (\alpha - 2\gamma) \quad (8)$$

или в безразмерной форме:

$$M_6^* = \frac{t_{ср}}{2k_{ср}} (\alpha - 2\gamma) \quad (9)$$

Проанализируем значение моментов $2M_6^*$, M_ϕ^* и M_Q^* при конкретных условиях простого процесса прокатки и разных режимах трения в очаге деформации. В табл. 1 представлены режимы обжатия, условия трения на контакте валков с деформируемой полосой при прокатке в валках диаметром 200, 300 и 400 мм. Расчетные значения угла нейтрального сечения γ , средней результирующей силы $Q_{ср.пр.}^*$, сил трения в зонах отставания $T_{отс}^*$ и опережения $T_{оп.}^*$, моментов $2M_6^*$, M_ϕ^* и M_Q^* также приведены в этой таблице. Как следует из табл. 1, во всех случаях

прокатки $Q_{\text{ср.пр.}}^*$ является отрицательной величиной, т.е. направленной противоположно движению полосы, что, согласно [4, 5], указывает на устойчивый без частичных пробуксовок процесс формоизменения металла.

Для примера на рис. 2 показано распределение нормального давления $p_x/2k_{\text{ср}}$ и удельных сил трения $t_x/2k_{\text{ср}}$, а также внутренних продольных нормальных

напряжений $\frac{\sigma_x}{2k_{\text{ср}}}$ и текущей продольной силы $Q_{\text{хпр.}}^*$ при прокатке первого образца с кулоновской моделью трения. Кроме того, на этом же рисунке приведены значения $Q_{\text{ср.пр.}}^*$, $T_{\text{отс.}}^*$, $T_{\text{оп.}}^*$ и угла γ .

Как видно, во всех сечениях продольные нормальные напряжения являются сжимающими, текущие продольные силы по всей длине очага деформации направлены противоположно по

отношению к движению полосы, $Q_{\text{ср.пр.}}^* = -0,0021$, что характеризует процесс прокатки как устойчивый.

Проанализируем результаты расчетов, приведенные в табл. 1. Как следует из неё, во всех случаях прокатки момент на бочках валков существенно превышает значения M_{ϕ}^* и M_Q^* , что соответствует закону сохранения энергии при простом процессе прокатки

$$2M_{\text{б}} = M_{\phi} + 2M_{\text{тр.ск.}}$$

где $2M_{\text{тр.ск.}}$ – момент сил трения скольжения в очаге деформации.

Обратим внимание на то, что в изменении моментов M_{ϕ}^* и M_Q^* наблюдается определенная согласованность. В зависимости от параметров прокатки они синхронно либо возрастают, либо уменьшаются. Причем указанные моменты существенно различаются только в двух случаях (см. расчеты под номером 1 и 6 при модели пластического трения). Эти результаты дают основание

предположить, что природа действия моментов M_{ϕ}^* и M_Q^* одинакова.

Таблица 1 – Расчётные значения моментов и средней результирующей продольных сил в очаге деформации

| Номер опыта | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|-----------------------|----------------|---------|----------|----------|---------|----------|----------|
| Толщина полосы, мм | h ₀ | 2,0 | 4,0 | 5,0 | 6,0 | 2,0 | 3,0 |
| | h ₁ | 1,75 | 2,0 | 3,0 | 4,0 | 1,5 | 2,0 |
| α , рад | | 0,05 | 0,1414 | 0,1155 | 0,1155 | 0,05 | 0,0701 |
| R, мм | | 100 | 100 | 150 | 150 | 200 | 200 |
| f или f_z | | 0,12 | 0,2 | 0,22 | 0,23 | 0,12 | 0,25 |
| | | 0,3 | 0,35 | 0,3 | 0,3 | 0,15 | 0,25 |
| γ , рад | | 0,0197 | 0,044 | 0,041 | 0,0424 | 0,021 | 0,022 |
| | | 0,0222 | 0,0472 | 0,04112 | 0,04216 | 0,01945 | 0,02727 |
| $Q_{\text{ср.пр.}}^*$ | | -0,0027 | -0,0119 | -0,0143 | -0,013 | -0,003 | -0,0046 |
| | | -0,0069 | -0,01832 | -0,01336 | -0,0136 | -0,0031 | -0,00736 |
| $T_{\text{отс.}}^*$ | | 0,00415 | 0,02826 | 0,02488 | 0,02375 | 0,00496 | 0,01237 |
| | | 0,00834 | 0,03981 | 0,02231 | 0,022 | 0,004582 | 0,01071 |
| $T_{\text{оп.}}^*$ | | 0,00274 | 0,01433 | 0,01501 | 0,01453 | 0,00329 | 0,01018 |
| | | 0,00666 | 0,01653 | 0,01234 | 0,01265 | 0,002917 | 0,00682 |
| $2M_{\text{б}}^*$ | | 0,00282 | 0,02786 | 0,0197 | 0,01844 | 0,00334 | 0,00488 |
| | | 0,00736 | 0,03254 | 0,01995 | 0,0187 | 0,00333 | 0,00778 |
| M_Q^* | | 0,0027 | 0,0119 | 0,013 | 0,013 | 0,003 | 0,0046 |
| | | 0,0069 | 0,01832 | 0,01336 | 0,0136 | 0,0031 | 0,00736 |
| M_{ϕ}^* | | 0,00237 | 0,011 | 0,0111 | 0,0115 | 0,0023 | 0,046 |
| | | 0,0024 | 0,0154 | 0,01108 | 0,0115 | 0,00226 | 0,00435 |
| M_Q^* / M_{ϕ}^* | | 1,14 | 1,08 | 1,18 | 1,13 | 1,3 | 1,07 |
| | | 2,88 | 1,19 | 1,18 | 1,18 | 1,37 | 1,69 |

Примечание: верхняя строчка для каждого прокатываемого образца относится к случаю, когда моделью трения в очаге деформации служила зависимость: $t_x = f \cdot p_x$, нижняя – закон пластического трения $t_x = f_z \cdot 2k_{\text{ср}}$.

Тогда средняя результирующая $Q_{\text{ср.пр.}}^*$ представляет собой внутреннюю силу, которую необходимо преодолеть активным силам, чтобы обеспечить формоизменение металла в продольном направлении. Именно в этом заключается физическая суть силы $Q_{\text{ср.пр.}}^*$.

Результаты проведенных расчетов также показали, что момент формоизменения полосы зависит

от условий трения на контакте. При модели трения скольжения ($t_x = f \cdot p_x$) он несколько меньше по сравнению с законом пластического трения.

Во всех рассматриваемых случаях прокатки M_Q^* несколько превышает M_{ϕ}^* , поэтому момент формоизменения металла, рассчитанный по формуле (4), должен давать результаты более близкие к эксперименту.

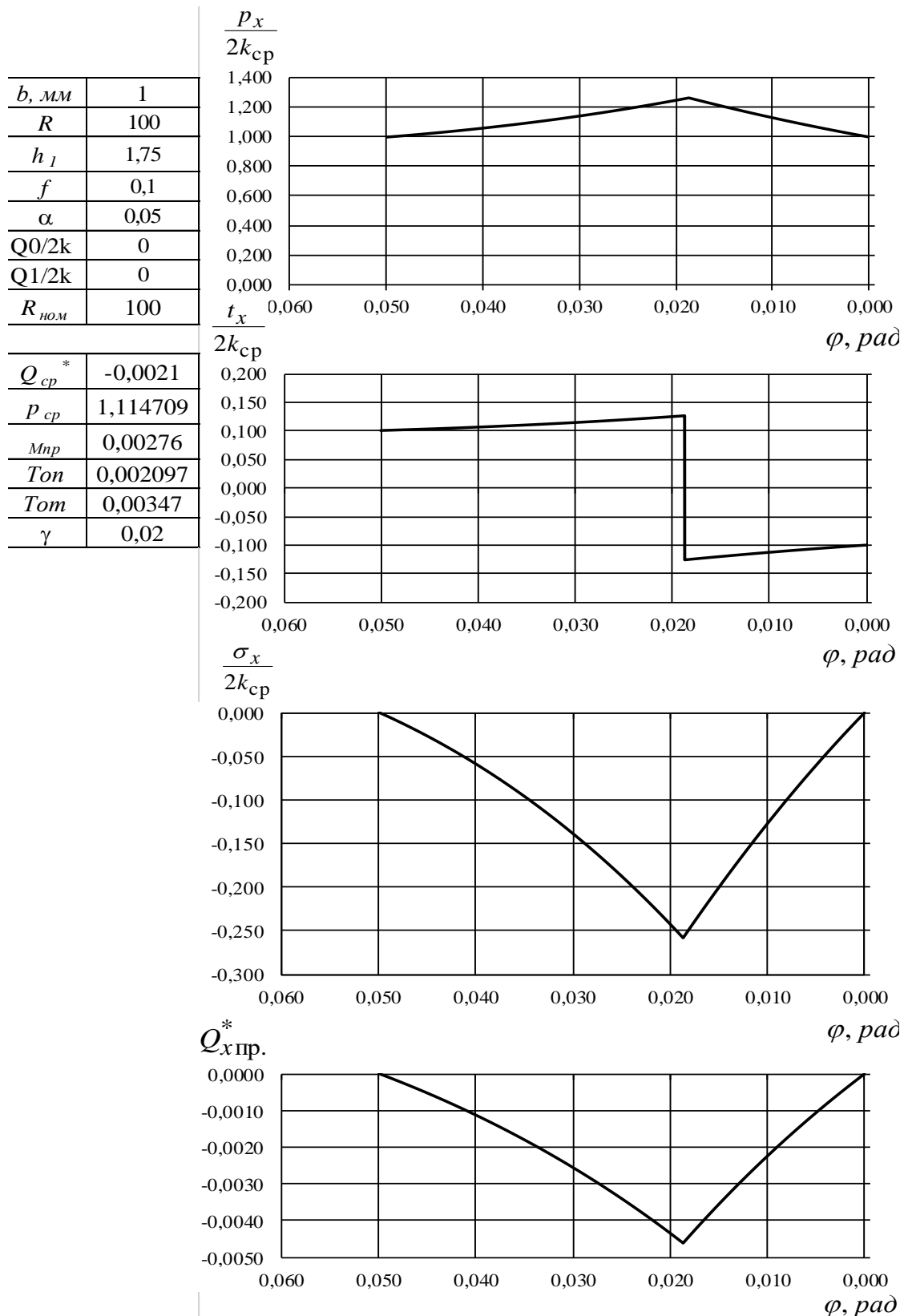


Рис. 2 – Эпюры контактных и внутренних напряжений, а также текущей продольной силы

Выводы. Предложена новая методика определения момента формоизменения металла, основанная на расчете средней результирующей продольных сил в очаге деформации. Расчеты момента формоизменения по предложенной методике дают

результаты на 15-30 % и более превышающие значения его, вычисленные по формуле Финка.

Список литературы

1. Виноградов А. П. Расход энергии при прокатке и мощность двигателей при станах / А. П. Виноградов. Металлург. 1935. № 2 – С. 34–38.
2. Павлов И. М. Теория прокатки / И. М. Павлов. М: Metallurgizdat, 1950. 610 с.
3. Выдрин В. Н. Динамика прокатных станов / В. Н. Выдрин. Свердловск: Metallurgizdat, 1960. 248 с.
4. Максименко О. П. Продольная устойчивость полосы в валках с анализом контактных условий: монография / О. П. Максименко, Д. И. Лобойко, М. К. Измайлова. Днепропетровск: ДГТУ, 2016. 213 с.
5. Максименко О. П. Анализ силового взаимодействия в очаге деформации при прокатке / О. П. Максименко, Д. И. Лобойко, Р. Я. Романюк. Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost. 2013. № 6 – С. 47–49.

References (transliterated)

1. Vinogradov A. P. Rashod energii pri prokatke i moschnost dvigateley pri stanah / A. P. Vinogradov. Metallurg. 1935. № 2 – pp. 34–38.
2. Pavlov I. M. Teoriya prokatki / I. M. Pavlov. M: Metallurgizdat, 1950. 610 p.
3. Vyidrin V. N. Dinamika prokatnyih stanov / V. N. Vyidrin. Sverdlovsk: Metallurgizdat, 1960. 248 p.
4. Maksimenko O. P. Prodolnaya ustoichivost polosyi v valkah s analizom kontaknyih usloviy: monografiya / O. P. Maksimenko, D. I. Loboyko, M. K. Izmaylova. Dneprodzerzhinsk: DGTU, 2016. 213 p.
5. Maksimenko O. P. Analiz silovogo vzaimodeystviya v ochage deformatsii pri prokatke / O. P. Maksimenko, D. I. Loboyko, R. Ya. Romanyuk. Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost. 2013. № 6 – pp. 47–49.

Поступила (received) 02.11.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Максименко Олег Павлович (Максименко Олег Павлович, Maksimenko Oleg Pavlovich) – доктор технічних наук, професор, , завідувач кафедри обробки металів тиском, Дніпровський державний технічний університет; м. Кам'янське, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0846-9869>; e-mail: O.maks1940@gmail.com

Лобойко Дар'я Ігорівна (Лобойко Дар'я Ігорівна, Loboiko Daria Igorevna) – асистент кафедри обробки металів тиском, Дніпровський державний технічний університет; м. Кам'янське, Україна; e-mail: darloboiko@gmail.com

Мініна Юлія Олександрівна (Минина Юлия Александровна, Minina Julia Alexandrovna) – студентка, Дніпровський державний технічний університет; м. Кам'янське, Україна